

水力タービン溶接作業における触覚刺激を用いた未熟練者のための技術習得支援 Skill Learning Assistance for Non-experts Using Tactile Based Guidance in Welding Francis Hydro Power Turbines

精密工学専攻 37号 橋爪敏樹
Toshiki Hashizume

1. はじめに

溶接とは金属を熱で溶かしてつなぎ合わせる作業である。溶接作業は自動車産業や造船業などの製造業において重要な役割を果たしている。しかし、溶接現場は「危険」「汚い」「きつい」の3K職場といわれており、作業者の肉体的、精神的に負担の大きい作業となっている。この問題を解決するために近年、溶接作業を自動化する要求が高まっている。自動化することにより作業環境を改善できるだけでなく、生産性を向上させることも可能となる。しかし、依然として完全な自動化が困難な作業も存在する。例えば水力タービンの溶接作業など、複雑な設計で高品質が要求されるような作業である。そのため、これらの作業はプロセスを最適化するなどを目的として作業に人が介入する必要がある。

関連研究⁽¹⁾⁽²⁾では、高度なCAD-CAMプログラミングとHuman-in-the-Loop制御を組み合わせることによりロボットの生産性と人の柔軟性を兼ね備えた新しいマルチパス溶接用のTIG溶接ロボット溶接システムを開発した。このシステムでは、溶接作業中に作業者がFig.1のように遠隔からモニタからの視覚情報を通じて作業を監視しており、自身の専門知識により予想外の環境変化に応じて作業を修正することができる。

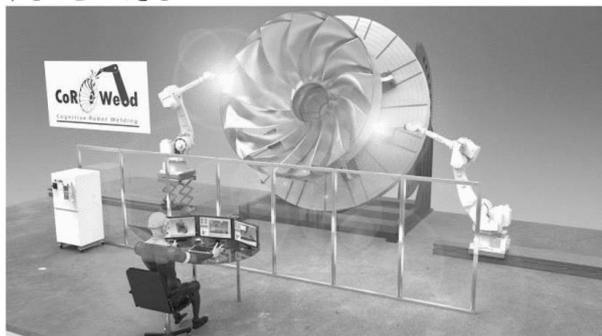


Fig.1 Overview of the hydro power turbine welding system⁽¹⁾

関連研究⁽¹⁾⁽²⁾および現状の溶接産業において、主に二点の課題が考えられる。一点目は遠隔操作における課題である。作業環境を改善するために作業者は遠隔で操作をおこなうが、遠隔操作では現地と空間的に隔離されているため、普段は自然に取得しているような情報が欠如する⁽³⁾。そのため、モニタ等を通じて遠隔の作業員に対して、現場の情報を提示する必要がある。特に水力タービンの溶接作業ではロボットの溶接部の可動域が非常に限定されていること、溶接部の溝の形状が不均一などの理由から複雑な操作が要求され、正確な情報を提示しなければ品質に影響するだけでなく、アームやトーチの先端が衝突する事故に繋がる恐れがある。

二点目の課題は熟練者不足における課題である。近年、生産年齢人口の不足が問題となっており、今後も減少し続けると予想されている⁽⁴⁾。一般的に溶接作業は高度な専門知識や技術が要求される。熟練者を育成するためには多くの練習や時間を必要とし、溶接作業をおこなえる熟練者の確保がさらに困難となる。そのため、今後は未熟練者が溶接作業をおこなう要求が高まると考えられる。

未熟練者に対して情報を提示する場合、直感的で自然に理解しやすい情報提示が有用である⁽⁵⁾。未熟練者に欠けている熟練者の操作技術のような身体的動作を補うためには、身体的に提示可能な提示手法が直感的な情報提示に繋がると考え、本研究では触覚刺激を用いた情報提示に注目する。

熟練者不足を解決するために溶接訓練のためのシステムが提案さ

れている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。これらの研究では仮想現実環境において溶接作業をおこなう、適切な動作になるように視覚情報や聴覚情報、触覚情報を用いてフィードバックする訓練システムを提案した。しかし、これらの研究において提案されたシステムでは、視覚情報や聴覚情報を用いてトーチの動作情報をフィードバックしており、フィードバックされた情報と作業者の操作の対応付けが適切にされておらず、未熟練者にとっては理解しづらい情報提示手法となっていると考えられる。また、これらの研究で実際に未熟練者が技術を習得できたかは検証されておらず、これらの情報提示の有用性は明らかとなっていない。そこで本研究では、遠隔からの溶接作業を想定し、触覚情報を用いた情報提示により、未熟練者が技術習得可能かを検証する。

2. 未熟練者のための情報提示と使用インタフェース

本章では溶接作業において未熟練者に対して提示すべき情報と手法、そのために使用するインタフェースについて述べる。

2.1 未熟練者に対して提示する情報

未熟練者の技術不足をシステムで補うことができれば、必要な生産性と品質を確保することができると考えられる。そのため、提示する情報の要件は未熟練者において欠けている技術、かつ溶接の品質に大きく影響する情報である。そこで、本研究ではPPM Robotics AS社のAutomation engineerからのヒアリング⁽⁸⁾を基にTable 1に示す情報を作業員に対して提示する。

Table 1 Classification of presented parameters

Welding parameters	Arc current
	Arc voltage
	Wire feed rate
	Positioning
	Travel speed
Robot related parameters	Working angle and Push angle
	Arm collision alert
	Notification about approaching some preset limitation in positioning

2.2 提示手法

Table 1で示したパラメータなど、情報一つ一つにはそれぞれ独自の意味があり、簡単に文字や数値で説明することはできない⁽⁹⁾。そのため、人の経験的に持つ概念に基づいた手法で提示することにより、提示された情報の意図を人が理解し、反映しやすくなると考えられる。以上の理由から、モニタからの視覚情報のみですべての情報をフィードバックすることは好ましくない。電流やワイヤ供給速度は作業員が日常的に数値から情報を取得しているため視覚的に提示することが適切だが、トーチの位置決め、移動速度、作業角度など熟練者の操作に関するパラメータは目に見えず言語的な情報ではないため、触覚情報を用いて身体的に誘導するような情報提示が適切だと考えられる。

さらにTable 1より、アームの衝突の通知や接近の警告情報を提示する必要がある。一つの感覚器官で多数の情報を提示することは判別が困難になるだけでなく、作業員の認知的負担の増加に繋がるため⁽⁹⁾、本研究ではこれらの情報は聴覚刺激を用いて提示する。

2.3 使用インタフェース

本研究で使用するインタフェースの要件として、必要な情報を正確に提示できること、未熟練者の使用を想定して、自然にわかりやす

い情報を提示できることがあげられる。そこで、本研究では操作デバイスとして Fig. 2 に示す三次元力覚入出力デバイスの Geomagic PHANToM Omni (以後 PHANToM)⁽¹⁰⁾ を使用する。タッチとスタイラスの動作を連動することにより、三次元的、直感的な操作が可能だけでなく、力覚提示により、身体的にロボットの動作情報をフィードバックできるため未熟練者の使用に適していると考えられる。ただし、本 PHANToM の力覚自由度は三自由度であり、回転軸方向への力覚は提示することができない。タッチの位置決めと移動速度の誘導情報に関しては PHANToM を用いた力覚で提示可能であるものの、作業角度を提示するためには別の情報提示手法が必要となる。

先行研究⁽¹¹⁾において振動グローブによる振動刺激を用いてロボットの位置、角度情報を提示することにより作業者の認知的負担を増やさずに誘導支援できることが明らかとなっている。また、振動グローブは装着しながら PHANToM の操作が可能のため、作業者の操作を阻害しない。さらに、知覚分解能が比較的高い指⁽¹²⁾に提示することが可能である。そこで、本研究においても振動グローブによる振動刺激を用いて作業角度の情報を提示することとする。Fig. 2 に振動グローブを示す。



(a) Geomagic PHANToM Omni⁽¹¹⁾ (b) Vibrotactile glove

Fig. 2 Interface for presenting guidance information

3. 誘導情報の設計

本研究において想定している作業は未熟練者における遠隔からの溶接作業であり、その作業中に未熟練者に対して提示する情報の設計について本章で述べる。これらの情報は未熟練者が欠けている技術を補うために提示する。Fig. 3 に誘導情報の提示システムについて示す。

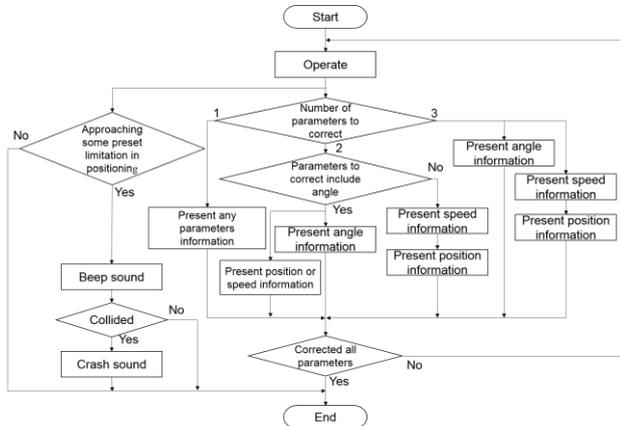


Fig. 3 System flow of the navigation information

誘導情報は、ある情報があらかじめ設定された値の範囲外になった場合に現在地から目標値までの差分 δ を0にするように提示される。操作方向のみ提示された場合、作業者の操作過多による行き過ぎや衝突などが想定される。そのため、位置、角度などの情報を、目標とする値との差に応じて、三段階で区別する。これを Navigation Level (以後 NL) と定義し、それぞれの誘導情報ごとに設計する。

3.1 振動刺激による角度情報の設計

角度情報は振動グローブによる振動刺激を用いて提示する。角度情報を提示するにあたり、所望の角度まで誘導するためには roll, pitch, yaw の三次元方向と移動量を提示する必要がある。本研究では方向は振動パターンの変化で表現し、移動量は仮現運動⁽¹³⁾と呼ばれる振動が移動しているように知覚される触錯覚現象の速度感変化で表現する。Fig. 4 に提案手法⁽¹⁴⁾の振動パターンを示す。軸との対応付けをわかりやすくするために、操作方向に移動するような仮現運動

にすることにより、操作方向を想起しやすいような振動パターンを設計した。また、Table 2 に角度情報における NL を示す。目標角度と現在角度との差分を δ_a とする。仮現運動は、Fig. 5 に示すように移動時間 (T_m)、待機時間 (T_w)、間隔時間 (T_i) から構成され、I-IV の順に提示される。これらの値を Table 2 に示すように NL に応じて定義する。

Table 2 Navigation Level and parameter of the angle navigation

Angle Range [Deg]	Navigation Level	Parameter	T_m [ms]	T_w [ms]	T_i [ms]
$10 \leq \delta_a$	3		1500	500	250
$5.0 \leq \delta_a < 10$	2		1000	250	250
$0.1 \leq \delta_a < 5.0$	1		500	250	250
$0 \leq \delta_a < 0.1$	0		0	0	0

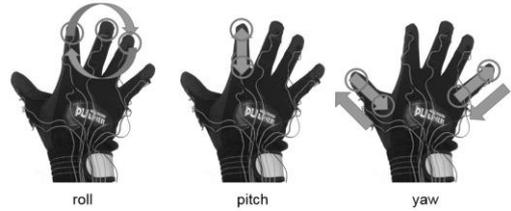


Fig. 4 Correspondence with glove and XYZ axes in proposed method

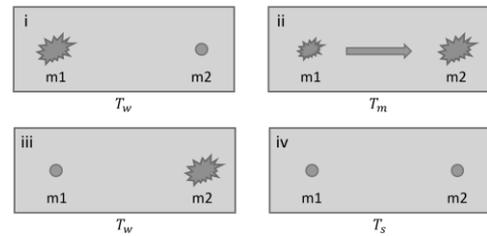


Fig. 5 Flow of the Phantom Sensation

3.2 力覚提示による移動速度、位置情報の設計

操作デバイスである PHANToM による力覚提示により、タッチの速度情報と位置情報を提示する。溶接作業において移動速度は所望の速度で一定にタッチを操作する必要があるが、未熟練者にとって適切な速度を保ちながら操作することは難しく、速度過多、あるいは速度不足で操作する場合は考えられる。そのため、移動速度を提示するためには加速、減速の二種類の情報を提示する必要がある。その際に進行方向に沿った向きの力覚を提示することにより、速度情報を表現可能だと考えた。進行方向と同じ方向に加えられた力覚情報を加速、進行方向と逆方向に加えられた力覚情報を減速と対応付ける。Table 3 に設計した NL を示す。目標速度と現在速度との差分を δ_s とする。力の大きさにより、加速量、減速量を対応付ける。

Table 3 Navigation Level of the travel speed information

F [N]	Speed Range [mm]	Navigation Level
0.9	$1.0 \leq \delta_s$	3
0.6	$0.5 \leq \delta_s < 1.0$	2
0.3	$0.1 \leq \delta_s < 0.5$	1
0	$0 \leq \delta_s < 0.1$	0

移動速度と同様にタッチの位置も常に母材と適切な距離を保ちながら操作する必要がある。アーク電圧は、電極の先端と母材間の距離に直接関係するため、電圧値を事前定義されたレベルに補正して維持するには、垂直方向の調整が必要になる場合がある。また、作業中にプールの異常に気づいた場合は作業者がタッチの水平方向の調整及び角度の調整をする必要がある。そのため、母材に対して水平方向および垂直方向の力覚を提示することにより、適切にタッチの位置決めができるように誘導する。速度情報と同様に NL を設計し、移動

量と力の大きさを対応付ける。Table 4 に位置情報における NL を示す。目標位置と現在位置との差分を δ_p とする。

Table 4 Navigation Level of the positioning information

F [N]	Distance Range [mm]	Navigation Level
0.9	$3.0 \leq \delta_p$	3
0.6	$1.5 \leq \delta_p < 3.0$	2
0.3	$0.1 \leq \delta_p < 1.5$	1
0	$0 \leq \delta_p < 0.1$	0

3.3 警告音、衝突通知音の設計

水力タービンの溶接作業ではロボットの可動域が狭く、位置、姿勢決めが難しい。さらに、遠隔操作においてはモニタからロボットの周辺環境を把握する必要があるが、距離感や微小な変位が分かりづらいため、衝突が発生しやすいと考えられる。そこで、聴覚を用いてアームが衝突した際に遠隔の作業者に衝突したことを知らせる衝突通知音と、事前設定した領域外へアプローチしている際に提示する警告音の二種類の音を状況に応じて作業者に提示する。本研究では、衝突通知音はクラッシュ音を用いて提示し、警告音はビーブ音を用いて提示する。警告音に関してはNLを設計し、周波数を変えることにより、アプローチしている距離と対応付ける。Table 5 に警告音におけるNLを示す。限界領域と現在位置との差分を δ_b とする。

Table 5 Navigation Level of the beep sound

Frequency [Hz]	Distance Range [mm]	Navigation Level
880	$2.0 \leq \delta_b$	3
660	$1.0 \leq \delta_b < 2.0$	2
440	$0.1 \leq \delta_b < 1.0$	1
0	$0 \leq \delta_b < 0.1$	0

4. 触覚提示による技術習得支援実験

本実験では、産業用ロボットを用いた溶接作業を想定し、3章で設計した触覚刺激を用いて設計した誘導情報による未熟練者の技術が習得可能な検証する。

4.1 実験環境

本実験ではロボットと作業者の安全を考慮して産業用ロボットの操作シミュレータを用いて実験をおこなう。シミュレータはゲーム開発エンジンであるUnityを用いて作成した。実験環境をFig.6に示す。

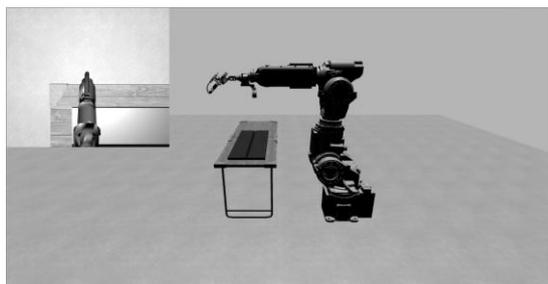


Fig. 6 Experimental environment

4.2 実験設定

溶接作業を想定し、作業者はPHANToMを用いて振動グローブを装着しながらシミュレータ内のロボットを操作し、なぞり作業をおこなう。本実験で提示する誘導情報は、振動刺激による角度情報と、力覚刺激による移動速度、位置情報である。作業中の作業者の認知的負担をNASA-TLX⁽¹⁵⁾を用いて評価する。また、定量的な評価として操作履歴から溶接作業の質を評価する。

被験者は20代の男女大学院生10名で溶接作業や産業用ロボットの操作経験はない。実験中の作業の慣れの影響を考慮し、提案手法に

よる情報提示のグループAと視覚情報のみの情報提示のグループBに分類し、それぞれ5名ずつおこない比較検証する。

4.2.1 実験手順

まず提案した誘導情報と操作を十分に対応付けさせること、また適切なパラメータ値による操作を理解させるために練習をおこなう。その後本番のタスクをおこなう。練習、本番タスクともにFig.6に示すシミュレータ内に存在する母材の溝をなぞる操作をおこなう。本番ではこのタスクを10回おこなう。10回作業をおこなった後に情報提示なしで操作を1回おこなう。

4.2.2 実験条件

本実験で使用するパラメータの定義をTable 6に示す。このパラメータ値は304Lステンレス鋼に適用される。電圧はギャップ距離2.4mmで12V、3.0mmで14Vとなり、線形に変化するとする。

Table 6 Definition of the welding parameters

Welding parameter	Value	Tolerances (\pm)
Arc voltage [V]	12	0.5 [V]
Arc current [A]	260	Regulated
Travel speed [mm/s]	2.4	15%
Wire feed rate [mm/min]	1040	Regulated
Working angle [Deg]	90	5 [Deg]
Push angle [Deg]	10	5 [Deg]

4.3 評価手法の検討

本実験で使用するシミュレータ内では溶接の品質まで評価することはできないため、操作履歴から4.3.1、4.3.2項で述べる手法を用いてビードの質を評価する。溶接する際に発生する溶接痕の盛り上がりやビードの質を評価する。溶接の質から作業者の技術を評価することができる。

4.3.1 パラメータ値から評価する手法

作業者の操作履歴より得られた値があらかじめ定義した溶接パラメータの範囲内にすべて収まっていれば溶接の質は良好だと言える。それから、操作履歴からパラメータ値がどれほど範囲内で操作できたかどうか分類分けする事により、溶接の質を評価する。本手法では角度、電圧(ギャップ距離)、速度の三つの入力パラメータから評価する。Table 7に定義したルールを示す。出力パラメータをビードの質(BQ)とし、BQはExcellent (E), Very Good (VG), Good (G), Average (A), Poor (P)の5段階で分類分けする。入力パラメータのAngle (A), Voltage (V), Speed (S)はGood (G), Low (L), High (H), Very Low (VL), Very High (VH)の5段階で分類する。

Table 7 Definition of the rule based on parameter classification

Rule	Description
Rule1	IF all parameters are G THEN BQ = E
Rule2	IF two parameters are G AND only one is L or H THEN BQ = VG
Rule3	IF one parameter is G AND two is L or H THEN BQ = G
Rule4	IF any parameter is VL or VH THEN BQ = A
Rule5	IF all parameters is VL or VH THEN BQ = P

4.3.2 ビード形状を推定する手法

ビードには適切な形状が定義されており、適切な形状と比較することにより、溶接の質を評価することができる。4.2.2項で述べた実験条件でPPM Robotics ASの実験室内でおこなわれた溶接実験より得られた多重線形回帰分析モデル式に本実験で得られたパラメータ値を代入することにより、ビード形状を推定することができる。このモデルは電流、電圧、ワイヤ供給速度、移動速度のパラメータのみに適用される。本実験で想定するビード形状はビード幅 $y_{BW} = 10$ mm、ビード高さ $y_{BH} = 1.2$ mm、ビード面積 $y_{BA} = 8$ mm²とし、許容誤差は $\pm 5\%$ とする。

4.4 実験結果と考察

Fig.7にNASA-TLXの結果を示す。本実験では50を基準値とし、0から100で回答する。負担が高いほど値を高く負担が低いほど値を

低く回答するように指示した。t検定による有意差検定の結果、どの項目にも有意差は見られなかった。しかし、作業負担 WWL において提案手法は使用する感覚刺激を増やしたのにも関わらず減少していることがわかった。触覚刺激による誘導情報は、誘導情報と操作が対応付けしやすく、作業者が直感的に自然に理解して操作できたためだと考えられる。また、視覚情報のみの情報提示では複数の情報を同時に数値として見ながら操作しなければならぬので認知的負担が高くなったと考えられる。

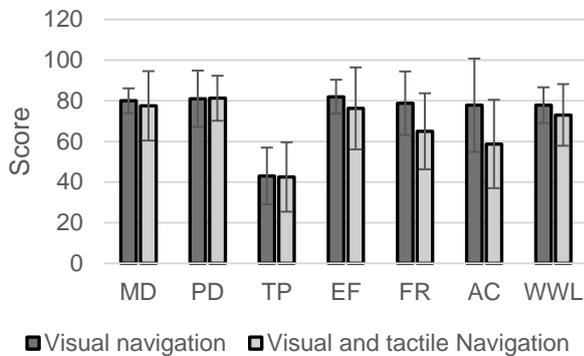
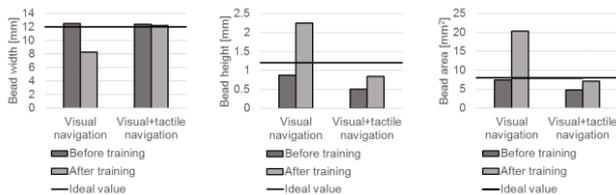


Fig. 7 Results of cognitive load on subjects

次に操作履歴に関する結果として、Table 8 に 4.3.1 項で述べたルールから得られたビードの質(BQ)の訓練前後の結果と Fig. 8 に推定されたビード形状の結果を示す。

Table 8 Result of bead quality based on work history

	Before training	After training
Visual navigation	S = VH V = H A = G BQ = A	S = VH V = VH A = G BQ = A
Visual + tactile navigation	S = VH V = H A = G BQ = A	S = H V = G A = G BQ = G



(a) Bead width (b) Bead height (c) Bead area
Fig. 8 Estimated value of bead geometry based on Multi-linear Regression Analysis (MRA) model

出力パラメータである BQ を見ると、視覚誘導のみでは訓練前後での作業成績は向上しなかったが、提案手法では作業成績が向上したことがわかる。また、推定されたビード形状はビード高さやビード断面積に関しては許容誤差範囲内ではないが、訓練することにより、理想値に近づいたことがわかった。しかし、訓練後に情報提示なしでおこなった作業は訓練前と比較すると比較的作業の質は向上しているが、許容誤差からは外れた値となった。つまり、品質としては不良だといえる。これは被験者が溶接に関する知識、技術が初級者であったこと、また、本番タスクの 10 回では習熟が不十分だったことが原因として考えられる。訓練中、作業者はある程度誘導情報に依存しながら操作しているため、情報提示がない状況でも作業の質が向上していなければ厳密には技術を取得できたとはいえない。しかし、Fig. 8 より、提案手法を用いた場合、作業者は同じ訓練期間でも、よ

り短期間で適切なパラメータ値を理解できたといえる。以上の結果をふまえ、提案手法による情報提示システムは溶接工の未熟練者が技術を習得する長期間の練習過程において用いることにより、効率的かつ短期間で技術習得ができる可能性を示しているといえる。

5. おわりに

本研究では、遠隔からの水力タービンの溶接作業を想定し、未熟練者のための技術習得支援システムを提案した。未熟練者に提示するための誘導情報を設計し、触覚刺激を用いて設計した誘導情報の有用性評価実験をおこなった。実験課題の遂行程度では十分なレベルでの技術の習得には至らなかったものの、未熟練者が訓練する過程において用いることにより、効率的に技術が習得できる可能性が示された。

今後は検証実験を引き続きおこない、実験から得られた知見の一般性を検証する。

参考文献

- (1) Csongor Mark Horvath, Peter Korondi, Trygve Thomessen, "Robotized Multi-Pass Tungsten Inner Gas Welding of Francis Hydro Power Turbines," Industrial Electronics (ISIE), 2017 IEEE 26th International Symposium on, pp.1759-1765, 2017.
- (2) Horvath, C.M., Korondi, P., "Supportive Robotic Welding System for Heavy, Small Series Production with Non-Uniform Welding Grooves," Acta Polytechnica Hungarica 15, 25, 2018.
- (3) Tomasz Kosicki, Trygve Thomessen, "Cognitive Human-Machine Interface Applied in Remote Support for Industrial Robot Systems," International Journal of Robotic Systems, pp.1-11, 2013.
- (4) Department of Economic and Social Affairs, World population prospects: the 2008 revision, United Nations, 2009.
- (5) 産業競争力懇談会, 2017, 「人」が主役となるものづくり, <http://www.cocn.jp/report/theme97-L.pdf>(2019年6月27日アクセス)
- (6) Yizhong Yang, Gun a. Lee, Yongwan Kim, Dongsik Jo, Jinsung Choi, Ki-Hong kim, "Virtual Reality Welding Training Simulator with 3D Multimodal Interaction," 2010 International Conference on Cyberworlds, pp.150-154, 2010.
- (7) Yizhong Wang, Wenjie Zhang, Yonghua Chen, Dingcheng Liu, Huafang Huang, "Study on underwater wet arc welding training with haptic device," 2009 IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurements Systems, 2009.
- (8) PPM Robotics AS, Automation engineer 1 名, 新妻研究室.
- (9) Trygve Thomessen and Tomasz Kosicki, "Cognitive audio-visual infocommunication applied in remote support for industrial robot systems", 2nd International Conference on Cognitive Infocommunications, pp.1-5, 2011.
- (10) 3D Printers, 3D Scanning, Software, Manufacturing and Healthcare Services. (n.d.). 3D Systems Touch Haptic Device, Retrieved May 27, 2019, from <https://www.3dsystems.com/haptics-devices/touch>
- (11) Takashi Hatano, Csongor M. Horvath, Trygve Thomessen, Mihoko Niitsuma, "A vibrotactile navigation aid for remote operation of an industrial robot," 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp.700-705, 2016.
- (12) Gabor Sziebig, Peter Korondi, "Remote operation and assistance in human robot interactions with vibrotactile feedback," 2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp.1753-1758, 2017.
- (13) Matjaz Ogrinc, Ildar Farkhatdinov, Rich Walker, Etienne Burdet, "Sensory integration of apparent motion speed and vibration magnitude," IEEE Transactions on Haptics (ToH), pp.1-9, 2018.
- (14) Toshiki Hashizume, Mihoko Niitsuma, "Pose Presentation of End Effector Using Vibrotactile Interface for Assistance in Motion Sharing of Industrial Robot Remote Operation," 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp.1186-1191, 2019.
- (15) S. Miyake, M. Kumashiro, "Subjective mental workload assessment technique-An introduction to NASATLX and SWAT and a proposal of simple scoring methods", The Japanese Journal of Ergonomics, Vol. 29, No. 6, pp. 399-408, 1993.